



②1 Aktenzeichen: 199 20 436.5  
②2 Anmeldetag: 4. 5. 1999  
④3 Offenlegungstag: 9. 11. 2000

⑦1 Anmelder:  
Heinzl, Joachim, Prof. Dr.-Ing., 81549 München, DE;  
Reiländer, Udo, 87669 Rieden, DE

⑦2 Erfinder:  
gleich Anmelder

⑤6 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
zu ziehende Druckschriften:

DE 195 35 481 C1  
DE 196 46 769 A1  
DE 41 24 717 A1  
US 57 51 090  
US 55 63 465

JP Patents Abstracts of Japan:  
1-148077 A., E- 818, Sep. 8, 1989, Vol. 13, No. 407;  
4-161077 A., E-1268, Sep. 24, 1992, Vol. 16, No. 459;

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen**

⑤4 Formschlüssiges Piezoschrittschaltwerk für kontinuierliche Bewegungen

⑤7 Piezo-Schrittschaltwerk für lineare und rotatorische Bewegungen. Das Schrittschaltwerk besteht aus einem bewegten Teil, einem festen Teil und mehreren Piezoaktoren, welche zu mindestens zwei Aktorgruppen zusammengefaßt sind. Die Piezoaktoren prägen dem bewegten Teil mittels Eingriffstücken über eine Verzahnung eine Längs- oder Umfangsverschiebung ein. Das In- und Außereingriffbringen der Verzahnung wird durch die primär zur Entwicklung des Vorschubs vorgesehenen Aktorgruppen selbst bewerkstelligt. Als Verzahnung eignet sich besonders ein Sägezahnprofil. Durch eine Überschneidung von intermittierenden Vorschubbewegungen wird eine kontinuierliche Vorschubbewegung ermöglicht.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, einen kompakten Piezoantrieb zu schaffen, der gesteuerte, kontinuierliche Bewegungen aus kleinen Einzelschritten zusammensetzt und formschlüssig auf das bewegte Teil überträgt.

Es sind Piezoantriebe unter der Bezeichnung "Inchworm" bekannt, die eine intermittierende Bewegung erzeugen, indem sie ein Glied veränderlicher Länge als Vorschubglied und zwei Klemmglieder als Antrieb zwischen zwei Körpern zur Erzeugung einer Relativbewegung anordnen. Eines der Klemmglieder ist starr mit dem ruhenden Körper verbunden, das andere ist bewegt und über das Vorschubglied am ruhenden Körper befestigt. Solche Anordnungen sind in DP 196 46 769 und US-Pat. 3,902,084 beschrieben. Das Vorschubglied ist jeweils zwischen den beiden Klemmgliedern angeordnet. Die übertragbare Kraft hängt dabei von der Reibkraft der Klemmglieder und dem Elastizitätsmodul des Gliedes mit veränderlicher Länge ab. Die Reibkraft ist meist begrenzt und von der Andruckkraft und dem Reibkoeffizienten zwischen den Klemmgliedern und dem bewegtem Teil abhängig.

Soweit als Klemmglieder rohrförmige Piezoelemente benutzt werden, die als bewegtes Teil einen Zylinder umschließen, sind sehr enge Toleranzen erforderlich, da sich z. B. der Innendurchmesser eines Piezorohres durch Aufladen der Elektroden an den Zylinderflächen nur um etwa 1 Promille verändern läßt. Um brauchbare Hübe zu erreichen, sind lange Piezostapel sinnvoll. In US-Pat. 5,332,942 wird deshalb vorgeschlagen, die Piezoelemente zum Betätigen der Klemmelemente in Vorschubrichtung anzuordnen und die Klemmbewegung durch Winkelhebel umzulenken, um zu einer kompakten Anordnung zu kommen.

Die Klemmkraft kann auch über Elektromagnete erzeugt werden, wie z. B. in US-Pat. 5,629,577 vorgeschlagen.

Nach US-Pat. 5,629,577 werden zum Klemmen elektrostatische Kräfte benutzt, die durch hauchdünne Isolierschichten zwischen unterschiedlich geladenen Halbleiterschichten als schaltbare Andruckkraft auftreten.

Um die übertragbare Kraft zu steigern, wird in DP 196 46 769 vorgeschlagen, anstelle des Reibschlusses zur Kraftübertragung den Formschluß einzusetzen. Der Formschluß wird durch Mikroverzahnungen an den Klemmgliedern hergestellt, die in eine entsprechende Verzahnung des bewegten Teils eingreifen und so von Schritt zu Schritt den Formschluß neu herstellen. Auch hierbei ist das Vorschubglied zwischen den beiden Haltegliedern angeordnet. Es kommen nacheinander jeweils ein ruhendes Halteglied und ein bewegtes Halteglied in Eingriff, so daß auch hier eine schrittweise und keine kontinuierliche Bewegung entsteht.

Um eine kontinuierliche Bewegung zu erzeugen, sind in der Anordnung nach US-Pat. 5,751,090 vier Klemmglieder und drei Vorschubglieder angeordnet. Jeweils zwei Klemmglieder sind gleichzeitig im Eingriff, während jeweils ein oder zwei Vorschubglieder die nicht in Eingriff befindlichen Klemmglieder vorschieben. Nur beim Wechsel der Klemmglieder ist noch ein kurzer Zwischenhalt nötig. Das Verhältnis von Vorschubphase zu Haltephase ist im Vergleich zu den vorher beschriebenen Anordnungen deutlich verbessert.

In US-Pat. 5,319,257 wird ein Mikroaktuator für konstante Vorschubgeschwindigkeit beschrieben. Es handelt sich um eine Anordnung, die besonders für den Einsatz im Vakuum ausgestattet ist. Die kontinuierliche x Vorschubbewegung wird durch die Anordnung von zwei Vorschubgliedern zwischen zwei Klemmgliedern ermöglicht. Die Anordnung ist insgesamt zweimal vorhanden und durch eine Kupplung aus Festkörpergelenken verbunden.

Die Anordnungen nach dem Stand der Technik haben eine durch Reibkraft begrenzte Halte- und Vorschubkraft, soweit sie eine kontinuierliche Bewegung erzeugen können. Der Vorschub ist dabei zugleich von der Belastung abhängig, so daß zur Erreichung einer vorgegebenen Position ein zusätzlicher Positionsgeber erforderlich ist. Formschlüssige Kraftübertragung ist bisher nur bei intermittierendem Antrieb möglich. Die Bewegung ist nicht gleichförmig, sondern immer wieder ruckartig unterbrochen.

Die Aufgabe der Erfindung ist es, eine kompakte Anordnung für ein Piezoschrittschaltwerk zu schaffen, das diese Nachteile vermeidet und die Möglichkeit bietet, ein Piezoschrittschaltwerk schlupffrei kontinuierlich zu betreiben.

Die Anordnung besteht im wesentlichen aus einem festen Gestell und einem bewegten Teil, einem Translator bzw. Rotor, der mit einer Verzahnung versehen ist. In einer bevorzugten Bauform ist die Verzahnung als Sägezahnprofil ausgeführt. Am Gestell sind mindestens zwei Aktorgruppen, bestehend aus Piezoaktoren angebracht. Das eine Ende der Piezoaktoren ist jeweils im Gestell befestigt, am anderen Ende befindet sich jeweils ein Eingriffsglied, welches mit einer Verzahnung versehen ist, welche in die Verzahnung auf dem Translator bzw. Rotor eingreifen kann. Der Antrieb kann als Rotationsantrieb und als Translationsantrieb aufgebaut werden. Die Funktionsweise des Antriebs besteht darin, daß die beiden Aktorgruppen wechselseitig mit den mit ihnen verbundenen Eingriffsgliedern mit dem Translator bzw. Rotor im Eingriff sind und diesem eine Vorschubbewegung einprägen. Jeweils kurz bevor die momentan im Eingriff befindliche Aktorgruppe ihre maximale Auslenkung erreicht, greift die jeweils andere Aktorgruppe mit ihrem Eingriffsglied in die Verzahnung des Abtriebs ein und übernimmt die Vorschubkraft. Erst danach lüftet die vorher im Eingriff befindliche Aktorgruppe die Verzahnung des zu ihr gehörigen Eingriffsgliedes und bewegt dieses rasch in die Ausgangsposition zurück. Diese Bewegung erfolgt wechselseitig zyklisch. Hierdurch ist eine kontinuierliche Bewegung möglich.

In einer bevorzugten Bauform besteht eine Aktorgruppe aus zwei nebeneinander liegenden Piezo-Aktoren. Durch gleichförmiges Verstellen dieser beiden Aktoren wird das zu dieser Aktorgruppe gehörende Eingriffsglied entlang der Aktor-Längsachse verschoben. Werden die beiden Aktoren unterschiedlich gelängt, verbiegt sich die Aktorgruppe, das zu ihr gehörende Eingriffsglied wird quer zur Aktorlängsachse verschoben. Diese Bewegung kann dazu genutzt werden, um die jeweilige Verzahnung zu lüften bzw. in Eingriff zu bringen. Bringt man an die Piezoaktoren zusätzlich zu den vorhandenen, im Aktorquerschnitt liegenden Elektroden weiterhin Elektroden an der Vorder- und Rückseite an, kann zum Lüften der Verzahnung der Schereffekt bei Piezokeramiken genutzt werden. Bei dieser Bauform ist dann pro Aktorgruppe nur noch ein Piezoaktor nötig. In einer bevorzugten Bauform eines Translationsantriebs hat der Translator einen rechteckigen Querschnitt, wobei an allen vier Seiten eine Verzahnung angebracht ist. Es sind weiterhin vier Aktorgruppen so am Gestell angebracht, daß die ihnen zugeordneten Eingriffsglieder jeweils an einer der verzahnten Flächen liegen. Die beiden jeweils gegenüberliegenden Aktorgruppen werden synchron betrieben. Der Antrieb ist somit momentenfrei. Die bei der Verwendung von Piezoaktoren notwendige Vorspannung wird in einer bevorzugten Bauform durch dünne Federplättchen erzeugt, welche parallel zur jeweiligen Aktorgruppe verlaufen. In diesen Federplättchen befinden sich Einschnitte, welche eine Biegung der Aktorgruppe erlauben. In einer weiteren bevorzugten Bauform besteht eine Aktorgruppe aus zwei Piezo-Aktoren, welche an den beiden gegenüberliegenden Seiten eines Ein-

griffsgliedes unter einem Winkel angebracht sind. Werden in dieser Anordnung beide Translatoren gelängt bzw. gekürzt, bewegt sich das Eingriffsglied quer zur Translationsachse. Diese Bewegung wird zum Eingreifen bzw. Lüften der Verzahnung benutzt. Wird einer der beiden Aktoren gelängt und der andere gekürzt, bewegt sich das Eingriffsglied entlang der Translationsachse. Diese Bewegung wird zum Vorschub benutzt.

In einer bevorzugten Bauform eines Rotationsantriebs sind an einer Seite des Rotors zwei Aktorgruppen angebracht, die wechselseitig dem Rotor eine Umfangsverschiebung einprägen.

Um einen bidirektionalen Betrieb zu ermöglichen, befinden sich bei einer bevorzugten Bauform auf den verzahnten Flächen jeweils Bereiche mit entgegengesetzter Ausrichtung der Sägezähne nebeneinander. Dabei sind die Bereiche unterschiedlicher Verzahnung so angelegt, daß bei Belastung kein Drehmoment um eine senkrecht zur Verzahnung stehende Achse entsteht.

Die Anordnung ist so gestaltet, daß sich die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten der Piezovorschubelemente und des bewegten Teils nicht auf die Eingriffsverhältnisse der formschlüssigen Eingriffsglieder auswirken. Die Mikroverzahnung kann zugleich als Maßverkörperung dienen, da die Anordnung schlupffrei arbeitet. Um Ungleichmäßigkeiten in der Mikroverzahnung auszugleichen, kann man die exakten Positionen mit einem Mastersystem vermessen und die Werte in einem elektronischen Speicher bereithalten.

Bevorzugte Ausführungsformen des erfindungsgemäßen Antriebs nach Anspruch 1 werden in Verbindung mit der Zeichnung beschrieben.

In der Zeichnung zeigt:

Fig. 1 eine bevorzugte Bauform eines Rotationsantriebs. Er besteht aus einem Rotor (1), der mit einer Sägeverzahnung ausgestattet ist und einem als fest angenommenen Gestell (2). Am Gestell sind zwei Aktorpaare (5, 6) und (7, 8) angebracht. An der der Gestellseite gegenüberliegenden Seite der Aktorpaare sind ebenfalls mit einer Sägeverzahnung ausgestattete Eingriffsglieder (3) und (4) angebracht. Zwischen dem Gestell (2) und dem jeweiligen Eingriffsglied (3, 4) sind Vorspannfedern (10) für die Aktorpaare (5, 6 und 7, 8) angebracht. Durch wechselseitiges Verschieben in Umfangsrichtung (9A) wird der Rotor in Rotation um die Rotationsachse (9) versetzt. In der Darstellung des erfindungsgemäßen Antriebs befindet sich das Aktorpaar (7, 8) in der Vorschubbewegung. Das Aktorpaar (5, 6) befindet sich im Rückhub und lüftet die Verzahnung durch stärkeres Ausdehnen des Aktors (5) gegenüber dem Aktor (6), wodurch sich eine Biegung des Aktorpaars (5, 6) vom Rotor weg ergibt.

Fig. 2 eine bevorzugte Ausführungsform eines Linearantriebs. Er besteht aus einem Translator (21) und einem Gestell (22). Am Gestell (22) sind vier Aktorpaare (25A, 26A und 25B, 26B und 27A, 28A und 27B, 28B) angebracht. Dabei liegen sich die Aktorpaare (25A, 26A) und (25B, 26B) sowie die Aktorpaare (27A, 28A) und (27B, 28B) gegenüber. Die sich gegenüberliegenden Aktorpaare befinden sich jeweils gleichzeitig im Eingriff. Die Aktorpaare werden ihrerseits jeweils von zwei Federn (10) vorgespannt. Der Translator (21) wird im Gestell (22) geführt. Jeweils die zwei gegenüberliegenden Aktorpaare schieben den Translator (21) abwechselnd in Vorschubrichtung (29) gegenüber dem Gestell voran.

Fig. 3 eine bevorzugte Bauform eines Aktorpaars (35, 36), welches zwischen einem Gestell (32) und einem Eingriffsglied (33) mit Verzahnung angebracht ist. Dieses Aktorpaar wird mit zwei Federn (10) vorgespannt, welche je-

weils zwei Verdünnungen (11) aufweisen, die jeweils eine elastische Verformung um die Achse (37) zulassen. Dadurch kann durch unterschiedliches Ausdehnen der Aktoren (35) und (36) eine Krümmung des Aktorpaars erreicht werden.

Fig. 4 eine bevorzugte Bauform eines Linearantriebs nach dem Gegenspielerprinzip. Er besteht aus einem Translator (41), welcher entlang der Translationsachse (49) relativ zu einem Gehäuse (42) verschoben wird. Zwischen den beiden Gehäuseteilen (42A) und (42B) sind vier Aktorpaare (47A, 48A), (45A, 46A), (47B, 48B), (45B, 46B) (nicht beschriftet, da verdeckt) angebracht, die jeweils in flachem Winkel auf Eingriffsglied (44A), (43A), (44B), (43B) (nicht beschriftet, da verdeckt) wirken. Durch gleiches Ausdehnen der beiden Aktoren an einem Eingriffsglied kann das Eingriffsglied jeweils geschlossen oder gelüftet werden, durch gegenläufiges Ausdehnen bzw. Zusammenziehen der beiden Aktoren kann das Eingriffsglied in oder entgegen der Vorschubrichtung (49) bewegt werden. Die Aktorpaare (47A, 48A) und (47B, 48B) und die Aktorpaare (45A, 46A) und (45B, 46B) sind jeweils gleichzeitig im Eingriff.

Fig. 5 einen bevorzugten Bewegungsverlauf zweier Aktorpaare. Dabei beschreibt die Linie (X1) die Bewegung des einen Aktorpaars und die Linie (X2) die Bewegung des anderen Aktorpaars. Im Bereich (50) befindet sich das erste Aktorpaar im Eingriff und schiebt den Translator bzw. Rotor gegenüber dem Gehäuse voran. Im Bereich (51) greift die Verzahnung des zweiten Eingriffspaares zu und übernimmt die Vorschubkraft. Im Bereich (52) schiebt das zweite Aktorpaar den Translator bzw. Rotor voran und das erste Aktorpaar zieht sich in die Ruhelage zurück. Im Bereich (53) übernimmt nun wieder das erste Aktorpaar die Vorschubkraft. Im Bereich (54) zieht sich das zweite Aktorpaar in die Ruhelage zurück und das erste Aktorpaar schiebt den Translator bzw. Rotor in Vorschubrichtung voran. Die beschriebenen Bewegungsbereiche wiederholen sich zyklisch.

Fig. 6 eine Sägeverzahnung für einen bidirektional wirkenden Linearantrieb. Die in der Mitte befindliche Verzahnung (62) ist in der Lage, Kräfte entlang der Translationsrichtung (64) aufzunehmen, die an den Rändern angebrachte Verzahnung (61) ist in der Lage, Kräfte entlang der Translationsrichtung (63) aufzunehmen. Durch die symmetrische Bauweise herrscht Momentenfreiheit um die Achse (65). Zwischen den gegensätzlich verzahnten Bereichen sind schmale Lücken (66) angebracht, um Fehlfunktionen vorzubeugen.

#### Patentansprüche

1. Piezo-Schrittschaltwerk, bestehend aus einem Stator und einem bewegten Teil, mit mindestens zwei abwechselnd in Eingriff kommenden Mitnehmern, die mit Mikroverzahnungen versehen sind, die in komplementäre Mikroverzahnungen eingreifen können, dadurch gekennzeichnet, daß jeder der Mitnehmer durch Piezoaktoren in Vorschubrichtung bewegt wird, und daß alle Mitnehmer etwa auf gleicher Höhe in Vorschubrichtung angeordnet sind und eingreifen.
2. Piezo-Schrittschaltwerk nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die bewegten Mitnehmer zur Erzeugung einer gleichförmigen Bewegung kurzzeitig gemeinsam in Eingriff sind, so daß eine Lastübernahme vom einen Mitnehmer bzw. von einer Mitnehmergruppe auf den bzw. die andere erfolgt, ohne daß die Bewegung angehalten wird.
3. Piezo-Schrittschaltwerk nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Mikroverzahnung sägezahnförmig ausgeführt ist, jeweils auf dem Mitnehmer und auf dem bewegten Teil.

4. Piezo-Schrittschaltwerk nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß sowohl an den Mitnehmern wie am bewegten Teil nebeneinander Bereiche mit in entgegengesetzter Richtung ausgerichteten Sägezahnverzahnungen angeordnet sind. 5
5. Piezo-Schrittschaltwerk nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß jeder Mitnehmer mit je zwei getrennt ansteuerbaren Piezostapeln verbunden ist, die parallel oder annähernd parallel in Vorschubrichtung angeordnet sind, wobei beide zur Kraftentfaltung in Vorschubrichtung eingesetzt werden, wenn ihnen durch die Steuerspannung die gleiche Längung aufgeprägt wird, die jedoch den Mitnehmer außer Eingriff bringen, wenn sie ungleich gelängt werden. 10
6. Piezo-Schrittschaltwerk nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Piezostapel durch Metallfedern vorgespannt sind, die ein Festkörpergelenk enthalten, das das Ein- und Ausrücken der Mitnehmer in die jeweilige Verzahnung zuläßt. 15
7. Piezo-Schrittschaltwerk nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß jeder Mitnehmer mit einem Piezostapel verbunden ist, dessen Elektroden so unterteilt geteilt sind, daß der Stapel sowohl gelängt und verkürzt als auch gebogen werden kann. 20
8. Piezoschrittschaltwerk nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß jeder Mitnehmer mit einem Piezostapel verbunden ist, der jeweils zusätzliche Elektroden enthält, die zusätzlich zum Längen und Verkürzen ein Verbiegen nach dem Schereffekt ermöglichen und dadurch den Eingriff in die Mikroverzahnung steuerbar machen. 25 30
9. Piezo-Schrittschaltwerk nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß Mitnehmer mit je zwei getrennt ansteuerbaren Piezostapeln verbunden ist, die in Strecklage unter einem leichten Winkelversatz parallel zur Vorschubrichtung angeordnet sind, wobei beide zur Kraftentfaltung in Vorschubrichtung nach dem Gegenspielerprinzip eingesetzt werden, wenn ihnen durch die Steuerspannung die entgegengesetzte Längungen aufgeprägt werden, die jedoch den Mitnehmer außer Eingriff bringen, wenn sie beide verkürzt werden. 35 40
10. Piezo-Schrittschaltwerk nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das bewegte Teil eine Linearbewegung ausführt.
11. Piezo-Schrittschaltwerk nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß der Querschnitt des bewegten Teils vorzugsweise quadratisch ist und bei dem um 90° versetzt piezoelektrisch angetriebene Mitnehmer paarweise im Gleichtakt von zwei verschiedenen Seiten angreifen. 45 50
12. Piezo-Schrittschaltwerk nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das bewegte Teil ein Rotor ist.
13. Piezo-Schrittschaltwerk nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die genauen Positionen des bewegten Teils relativ zum Stator in Abhängigkeit von der Zahnposition vermessen und gespeichert sind, so daß eine genaue Positionierung auch ohne zusätzliches Meßsystem möglich ist. 55

- Leerseite -

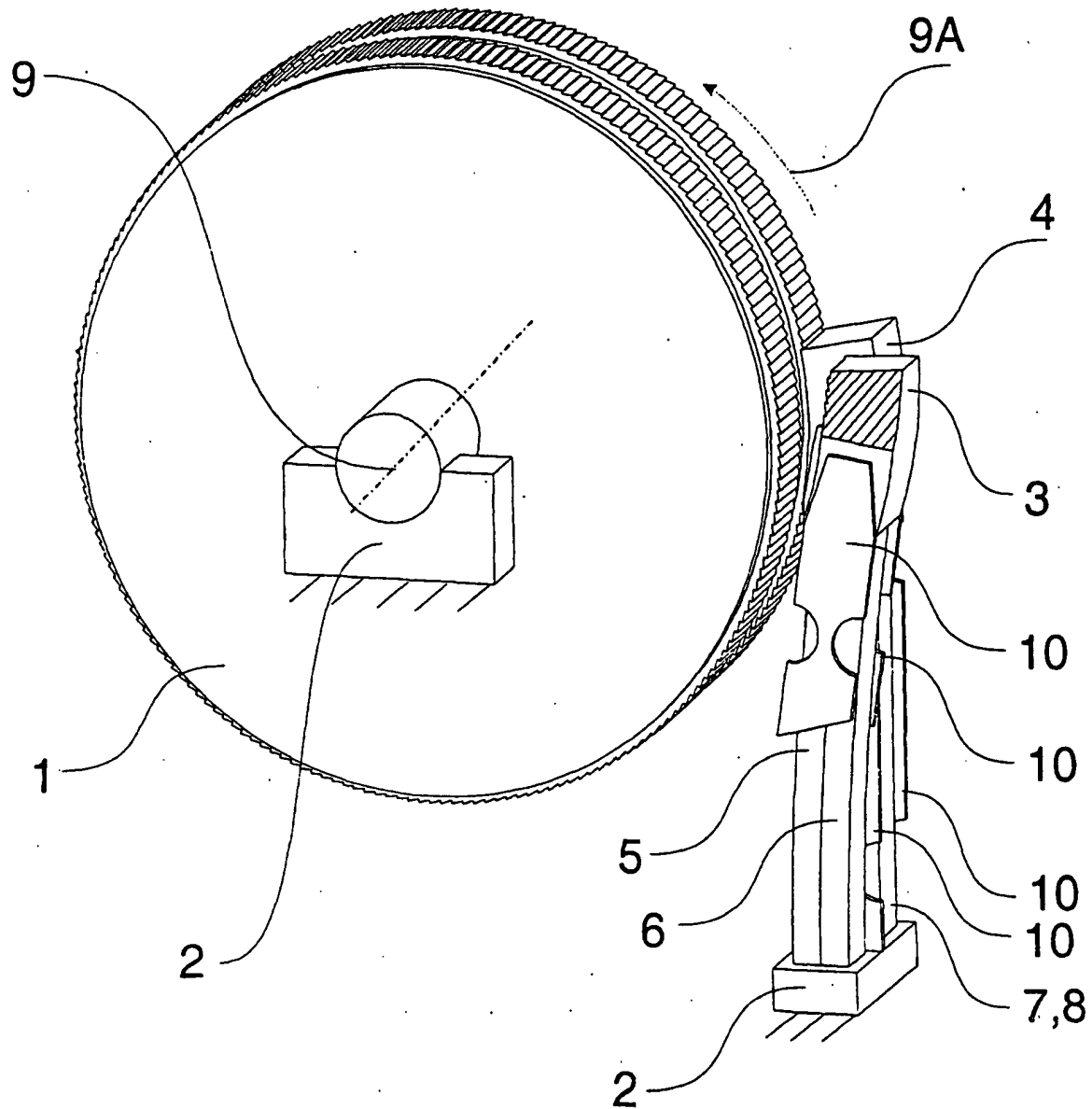


Fig. 1

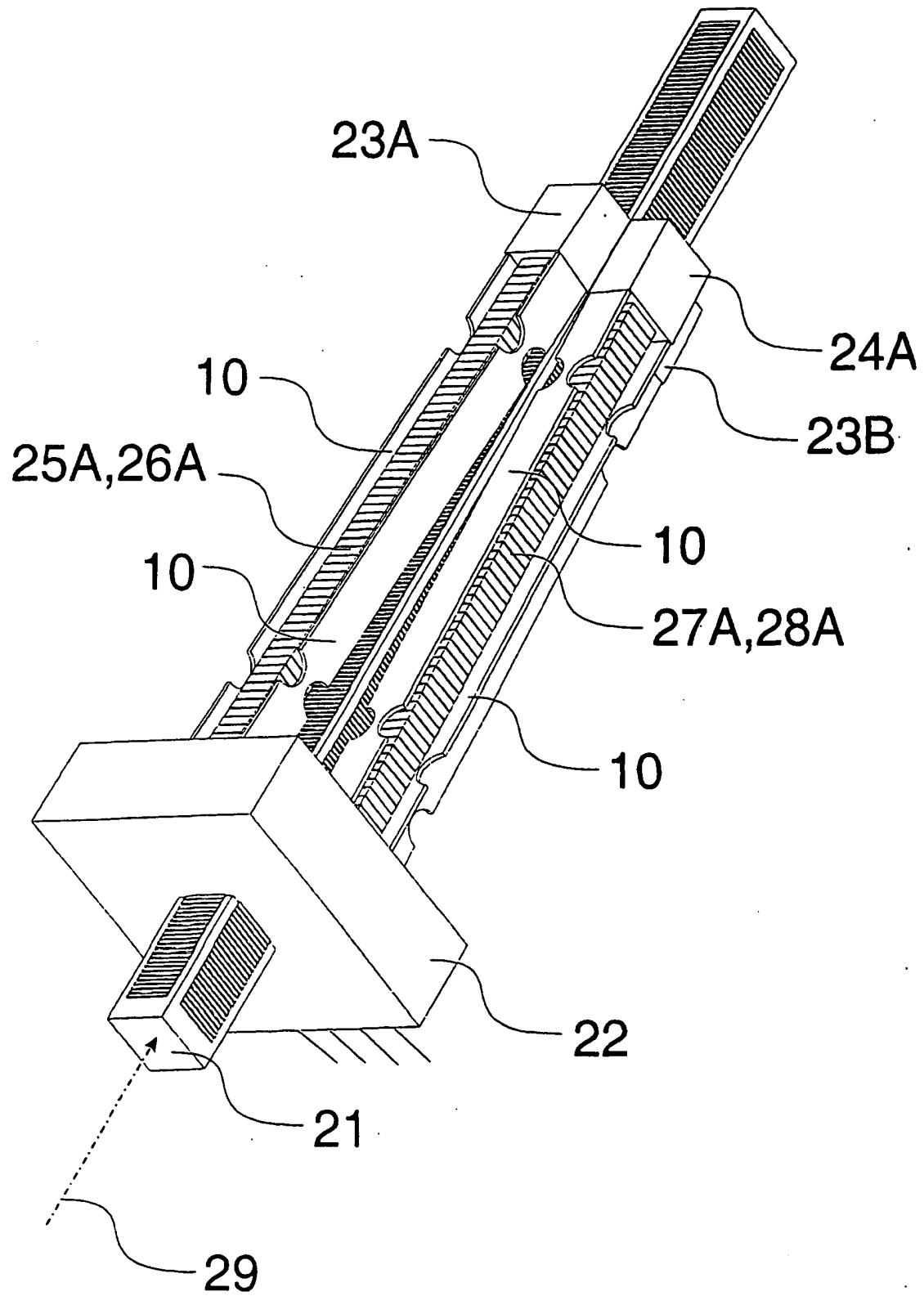


Fig. 2

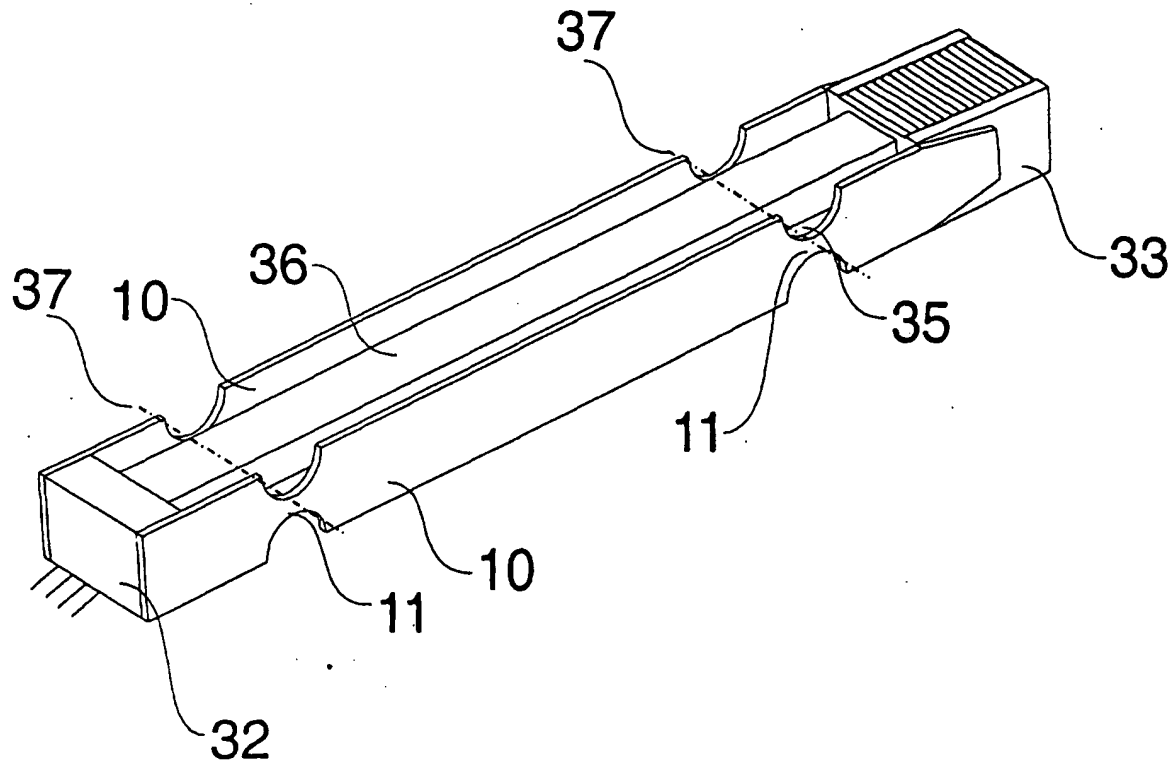


Fig. 3



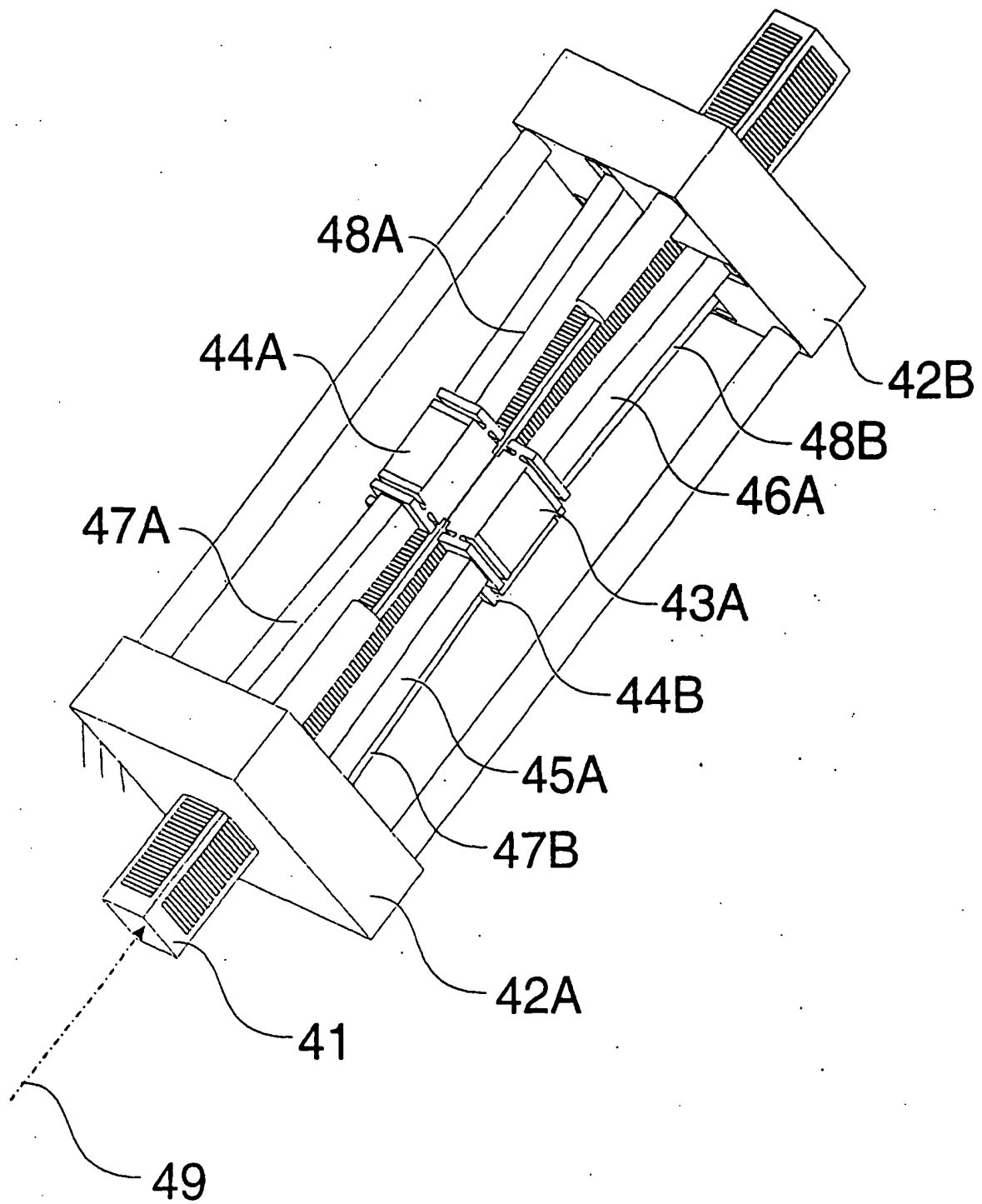


Fig. 4

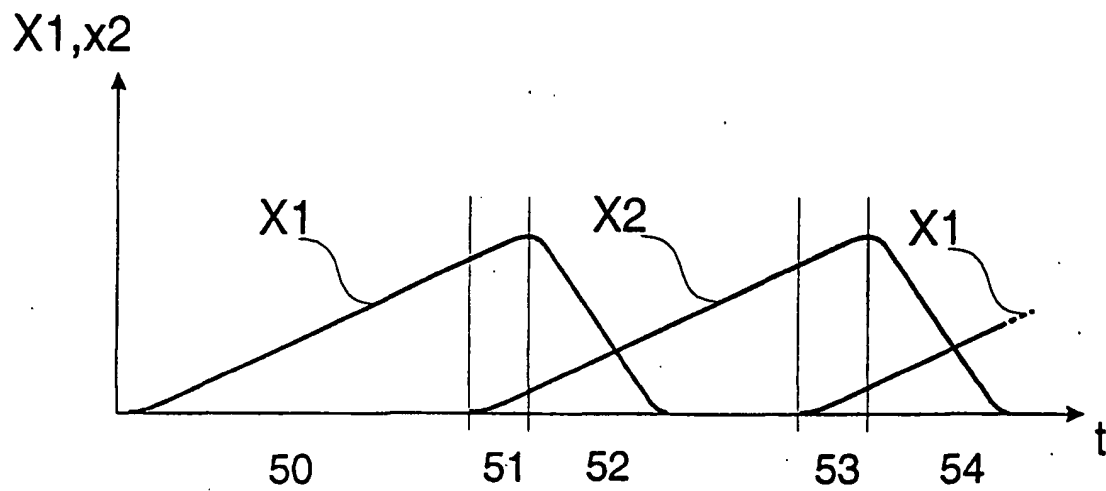


Fig. 5

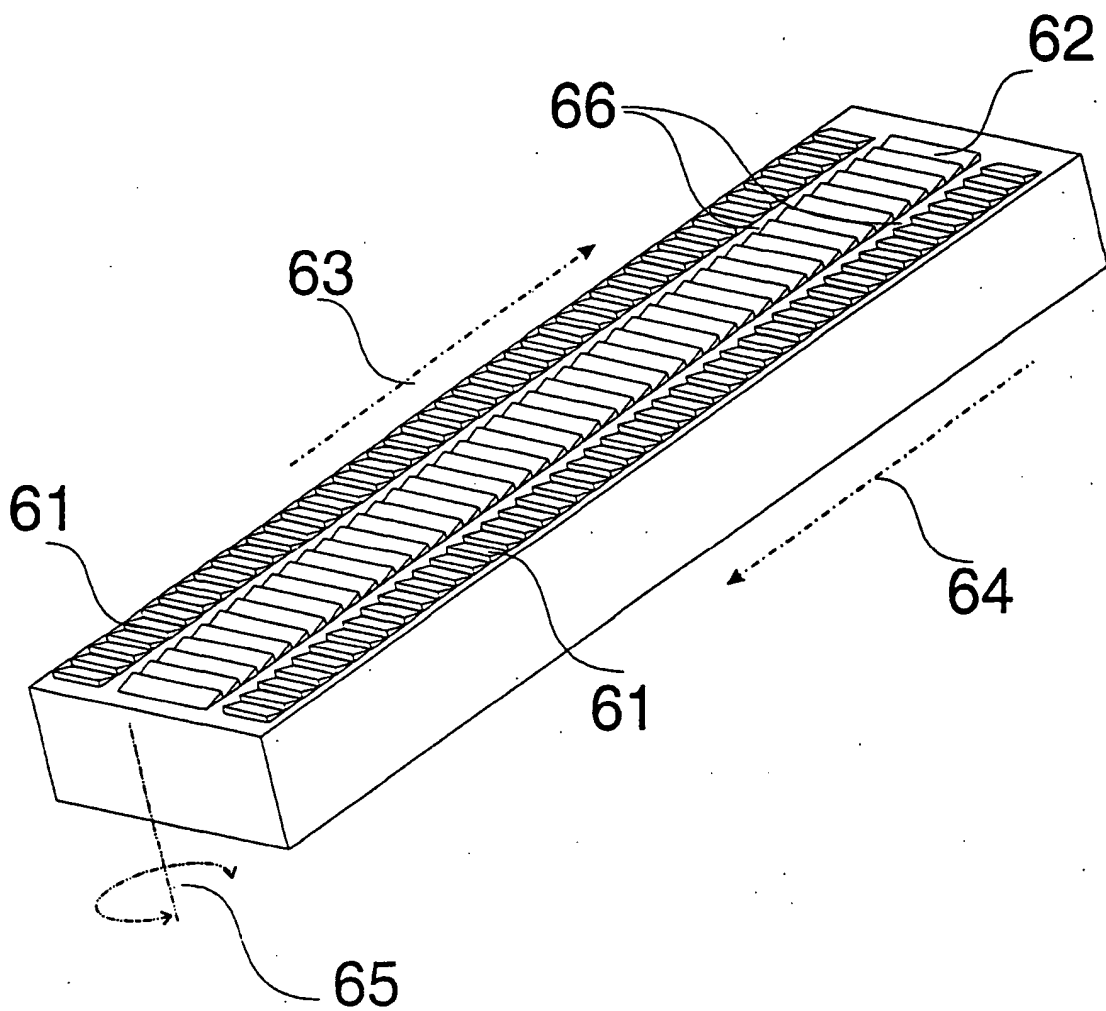


Fig. 6